

VALIDACIÓN DE ROTH C PARA SIMULAR CAMBIOS EN EL CARBONO ORGANICO EDÁFICO BAJO ROTACIONES MIXTAS Y SIEMBRA DIRECTA

FÁTIMA SOLEDAD MONTIEL¹; ROCÍO MORENO²; GERMÁN FRANCO DOMÍNGUEZ¹;
GUILLERMO ALBERTO STUDDERT*¹

Recibido: 23/10/2018
Recibido con revisiones: 6/5/2019
Aceptado: 6/6/2019

RESUMEN

El efecto de prácticas de manejo que inciden sobre el carbono (C) orgánico del suelo (COS) puede ser estudiada usando modelos de simulación. RothC es un modelo sencillo desarrollado para agricultura y labranza convencional (LC). Para los suelos del Sudeste Bonaerense (SEB) se hipotetiza que RothC simulará satisfactoriamente cambios en el COS: 1) bajo rotaciones mixtas y 2) bajo siembra directa (SD). Se calcularon indicadores estadísticos basados en la diferencia entre valores de COS observados en la capa arable de un ensayo de larga duración y los simulados. Se evaluó el total de datos y discriminando entre tratamientos de fertilización con nitrógeno (N) (Con N y Sin N), sistemas de labranza (SD y LC) y períodos bajo agricultura y bajo pastura. En general (todos los datos o separados en Con N y Sin N), el modelo representó satisfactoriamente la variación del COS. Por otro lado, RothC tuvo un comportamiento aceptable en los períodos bajo agricultura y bajo pastura en rotación mixta. No obstante, el desempeño del modelo fue algo más pobre cuando las pasturas en la rotación eran de más de dos años o de tres años asociadas a períodos agrícolas previos prolongados. Bajo pastura continua RothC simuló correctamente la variación del COS. En los períodos agrícolas de las rotaciones mixtas, el desempeño del modelo fue bueno y similar bajo LC y SD. Bajo agricultura continua con SD el modelo presentó un muy buen comportamiento. Se concluye que, para suelos del SEB, RothC simuló adecuadamente cambios en el COS bajo rotaciones mixtas y bajo SD. Sin embargo, existieron desviaciones en los resultados de las simulaciones con RothC que podrían deberse a la forma de estimación de algunos datos para ingresar al modelo y que deberían ser ajustados para mejorar aún más las simulaciones.

Palabras clave: materia orgánica, sistemas de cultivo, labranza conservacionista, pasturas.

VALIDATION OF ROTH C TO SIMULATE CHANGES IN SOIL ORGANIC CARBON UNDER CROP-PASTURE ROTATIONS AND NO-TILLAGE

ABSTRACT

The effect of management practices that affect soil organic carbon (COS) can be studied through simulation models. RothC is a simple model developed for cropping under conventional tillage (LC). For the soils of the Southeastern Buenos Aires Province (SEB) it has been hypothesized that RothC will simulate satisfactorily change in COS: 1) under crop-pasture rotations, and 2) under no-tillage (SD). Statistical indicators were based on the difference between observed COS values in the arable layer along a long-term experiment and the simulated ones. This was evaluated both the whole data set and discriminated between treatments of nitrogen (N) fertilization (with (Con N) and without (Sin N) N), tillage systems (SD and LC), and periods under cropping and under pasture. In general (the whole set of data or discriminated between Con N and Sin N), the model represented COS variation satisfactorily along time. On the other hand, RothC showed an acceptable behavior along periods either under cropping or under pasture in crop-pasture rotation. However, model behavior was somehow poorer when pastures in the rotation lasted more than two or three years but with prolonged previous cropping periods. Under continuous pasture RothC simulated COS variation very well. In the periods under cropping of crop-pasture rotations, changes in COS were simulated satisfactorily without difference between SD and LC. Under continuous cropping with SD, model performance was very good. It is concluded that for soils of the SEB, RothC adequately simulated changes in COS both under crop-pasture rotations and SD. However, some deviations existed in some simulations that could be attributed to the way some input data were estimated. These estimations should be adjusted to improve simulations even more.

Keywords: organic matter, cropping systems, conservation tillage, pastures.

1 Fac. Cs. Agrarias, Univ. Nac. Mar del Plata, Unidad integrada Balcarce

2 Profesional autónoma

*Autor de contacto: studdert.guillermo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El carbono (C) orgánico (COS) es uno de los componentes más importantes del suelo debido a, entre otras cosas, su rol de ayudar a la resistencia y resiliencia del suelo ante los disturbios provocados por la agricultura. Con ello, contribuye a la preservación del funcionamiento del suelo en el agroecosistema (Weil & Magdoff, 2004; Lal, 2010; Quiroga & Studdert, 2014). La agricultura ha generado disminución del COS, reduciendo la capacidad productiva y afectando la sustentabilidad del sistema de producción (Martínez *et al.*, 2008; Lal, 2010; Sainz Rozas *et al.*, 2011) y la capacidad del suelo de cumplir con sus funciones en el agroecosistema (*i.e.* salud edáfica) (Doran & Zeiss, 2000). Es necesario mantener o recuperar el nivel de COS para que el suelo pueda funcionar adecuadamente para una agricultura sustentable (Lal, 2010).

La dinámica del COS responde a una mecánica de balance entre los ingresos y las salidas de C del suelo (Janzen, 2006; Quiroga & Studdert, 2014). Por ello, es imprescindible manejar los mecanismos de entrada de C al suelo a través de rotaciones de cultivos, sistema de labranza y manejo de residuos para reducir y compensar las pérdidas por mineralización (Domínguez *et al.*, 2009). Las rotaciones mixtas contribuyen a aumentar el COS durante la fase bajo pastura debido a que mantienen periodos relativamente largos sin laboreo, hacen un importante aporte de material vegetal (raíces y biomasa aérea) (Studdert *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2011; Franzuebbers *et al.*, 2014) y ofrecen mayor continuidad de crecimiento radical y, con ello, una mejor distribución temporal y espacial del aporte de C (Siri Prieto & Ernst, 2010). Por otro lado, el laboreo agresivo (LC) incorpora los residuos al suelo favoreciendo su descomposición, e incrementa el flujo de oxígeno y la exposición de las fracciones más lábiles del COS a una más rápida e intensa mineralización (Reicosky *et al.*, 2011). Por el contrario, en el ambiente edáfico provocado por la siembra directa (SD, *i.e.* sin laboreo) se reduce la tasa de descomposición de los residuos y hay acumulación de COS en los primeros centímetros del perfil (Puget & Lal, 2005; Powlson *et al.*, 2014).

La complejidad de los procesos y mecanismos de la dinámica del COS y la gran cantidad de factores que inciden, hacen difícil no sólo su estudio, sino también el diseño de las prácticas a emplear para manejarlos (Puget & Lal, 2005). Los modelos matemáticos de simulación permiten estimar cambios en el COS asociados al uso del suelo y a variaciones ambientales (Smith *et al.*, 1997). Estos modelos pueden ser utilizados para comprender sistemas complejos y son una herramienta poderosa para resolver problemas (Jørgensen & Bendoricchio, 2001). Sin embargo, para ser útiles como apoyo a la toma de decisiones de productores y profesionales, deben ser sencillos y utilizar información de fácil accesibilidad (Studdert *et al.*, 2011).

El modelo RothC (Jenkinson *et al.*, 1987), es simple y se ha utilizado amplia y exitosamente en muchas regiones del mundo (Jenkinson *et al.*, 1991; Skjemstad *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2011; Studdert *et al.*, 2011; Senapati *et al.*, 2014). Permite simular los cambios en el COS a partir de la relación entre su dinámica y las condiciones agroclimáticas y de producción. Las diferentes situaciones de uso se caracterizan a través de tipo de suelo, variables meteorológicas (temperatura, precipitaciones, evapotranspiración), cobertura vegetal y aporte de C por los residuos de los cultivos. A partir de esta información, se pueden estimar cambios en el COS y esto ser utilizado para evaluar el efecto de distintos escenarios de manejo.

RothC fue concebido para simular cambios en el COS en la capa arable de suelos bien drenados, laboreados y en clima templado (Jenkinson *et al.*, 1987). Si bien las condiciones para las cuales fue desarrollado son similares a las del Sudeste Bonaerense (SEB), es necesaria la validación local (Faloon & Smith, 2002). Studdert *et al.* (2011) concluyeron que RothC simuló satisfactoriamente cambios en el stock de COS en molisoles del SEB con secuencias de cultivos de cosecha bajo LC. No obstante, si bien los sistemas de producción del SEB tienden hacia una agricultura continua, la implementación de rotaciones mixtas (*i.e.* períodos de cultivos agrícolas alternados con períodos con pasturas) son una alternativa para ayudar a revertir efectos negativos en el suelo

(Studdert *et al.*, 1997; Siri Prieto & Ernst, 2010, Franzluebbbers *et al.*, 2014). Por lo tanto, sería de interés estudiar el comportamiento de RothC cuando se incluyen períodos bajo pastura en la rotación para recuperar el COS luego de períodos agrícolas (Liu *et al.*, 2011). Por otro lado, alrededor del 80% de la superficie agrícola del SEB está bajo SD (AAPRESID, 2016). A pesar de la no remoción del suelo y la presencia de residuos en superficie, estudios en el SEB han demostrado que los cambios en el COS en los primeros 20 cm del perfil, no han mostrado diferencias de importancia al comparar LC y SD (Domínguez *et al.*, 2009; Studdert *et al.*, 2018). Por ello, dado su buen comportamiento bajo LC (Studdert *et al.*, 2011), sería de interés estudiar el comportamiento de RothC bajo SD.

Para las condiciones de los suelos del SEB, se hipotetiza que RothC simulará satisfactoriamente: 1) cambios en el COS en rotaciones mixtas y 2) cambios en el COS bajo SD. Para poner a prueba las hipótesis formuladas, el objetivo es evaluar el desempeño de RothC para simular los cambios en el COS en Molisoles del SEB bajo sistemas de cultivo (SC) que incluyan pasturas en la rotación y/o SD. Se validará RothC con información de un ensayo de larga duración desarrollado desde 1976.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y descripción del ensayo

Se utilizó información generada en un ensayo de larga duración de rotaciones mixtas y sistemas de labranza llevado a cabo en la Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP – Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce (UIB) (37° 45´S; 58° 18´W; 130 msnm). El suelo es un complejo de Argiudol Típico (Soil Survey Staff, 2014) (serie Mar del Plata, INTA, 1979) y Argiudol Petrocálcico (Soil Survey Staff, 2014) (serie Balcarce, INTA, 1979) de textura superficial franca (231, 358 y 411 g kg⁻¹ de arcilla, limo y arena, respectivamente) y pH de 5,4, con menos de 2% de pendiente (bajo nivel de erosión).

El ensayo fue iniciado en 1976 con un diseño experimental en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas dividi-

das, tres repeticiones y unidades experimentales de 10,0 m x 17,5 m. El factor "SC" (siete niveles: T1 a T7) fue asignado a las parcelas principales y el factor "Fertilización nitrogenada" (dos niveles: Con nitrógeno (N) y Sin N), a las subparcelas. El experimento fue conducido en dos fases consecutivas:

- Fase 1: se desarrolló entre los años 1976 y 1993 con distintas combinaciones de períodos bajo cultivos de cosecha o como abonos verdes y períodos bajo pasturas implantadas (Studdert *et al.*, 1997). Los tratamientos T6 y T7 de esta fase tuvieron agricultura continua y no fueron utilizados en este trabajo porque se utilizaron en otro (Studdert *et al.*, 2011). En el resto de los tratamientos, los períodos agrícolas se alternaron con los períodos bajo pastura en una proporción de aproximadamente 50% del tiempo agricultura y 50% del tiempo pastura (T2) y 75% del tiempo agricultura y 25% del tiempo pastura (T1, T3, T4 y T5). La duración de las pasturas fue de dos a tres años (T1, T3, y T5) o de cuatro a cinco años (T2 y T4). En la **Tabla 1** se presenta el esquema de las rotaciones estudiadas. Los cultivos de cosecha en los períodos agrícolas fueron trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.) y papa (*Solanum tuberosum* L.). Como abonos verdes se utilizaron avena (*Avena sativa* L.), y vicia (*Vicia sativa* L., sólo en el T6 no utilizado en este trabajo). Las pasturas estuvieron constituidas principalmente por gramíneas (pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.), falaris bulbosa (*Phalaris tuberosa* L.); festuca alta (*Festuca arundinacea* Schreb.) y rye-grass perenne (*Lolium perenne* L.)) en mezcla con leguminosas (trébol blanco (*Trifolium repens* L.), trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) y alfalfa (*Medicago sativa* L.)). Las pasturas no fueron pastoreadas, pero sí fueron cortadas periódicamente y el material cortado fue removido. Las camas de siembra, tanto para las pasturas como para los cultivos agrícolas, fueron realizadas con LC (arado de rejas, rastra de discos y rastra de dientes o vibrocultivador) y las labores se iniciaron no menos de tres meses antes de la siembra. Las prácticas de manejo de cultivos y pasturas fueron las recomendadas en la

zona para cada especie o combinación de especies. Los tratamientos de fertilización nitrogenada fueron aplicados a partir de 1980 sólo a los cultivos de cosecha. El N fue aplicado bajo la forma de urea (46-0-0) al voleo y en el momento del ciclo de los cultivos que significara una máxima efi-

ciencia de recuperación. Las dosis fueron: 0 (Sin N) y 90 (Con N) kg N ha⁻¹.

- Fase 2: desarrollada a partir de 1994, continuando el ensayo luego de la Fase 1 e introduciendo el sistema de labranza (SD y LC) como variable. En esta fase, los SC quedaron

Tabla 1. Sistemas de cultivo del ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza. Las celdas sombreadas indican utilización de siembra directa. Las celdas tachadas no fueron utilizadas para este trabajo. T: trigo, S: soja; G: girasol; M: maíz; Pp: pastura; P: papa; A: abono verde de avena; Av: abono verde de avena y vicia; ATr: abono verde de avena y trébol rojo.

Table 1. Cropping systems in the crop-pasture rotation and tillage system experiment. Shaded cells indicate use of no-tillage. Crossed out cells were not used for this work. T: wheat, S: soybean, G: sunflower, M: corn, Pp: pasture, P: potato, A: oat as green manure, Av: oat and vetch as green manure, ATr: oat and red clover as green manure.

Fase	Año	Sistema de cultivo						
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1	1976	Pp	Pp	T	T	Pp	P	P
	1977	Pp	Pp	A-G	A-G	Pp	T	T
	1978	P	Pp	Pp	P	P	Av-P	A-P
	1979	T	Pp	Pp	M	M	T	T
	1980	A-P	P	P	T	T	Av-P	A-P
	1981	T	M	M	A-G	A-G	T	T
	1982	Pp	T	T	Pp	T	Av-P	A-P
	1983	Pp	A-G	A-G	Pp	A-G	T	T
	1984	P	Pp	T	Pp	Pp	Av-P	A-P
	1985	T	Pp	A-G	Pp	Pp	T	T
	1986	A-P	Pp	T	P	P	Av-P	A-P
	1987	T	Pp	Pp	T	T	T	T
	1988	Pp	Pp	Pp	P	M	Av-P	A-P
	1989	Pp	P	P	T	G	T	T
	1990	P	T	T	M	T	Av-P	A-P
	1991	T	M	P	G	M	T	T
	1992	A-P	G	T	T	G	ATr	A-P
	1993	T	T	M	G	T	ATr	T
	2	1994	Pp	Pp	Pp	Pp	Pp	M
1995		Pp	Pp	Pp	Pp	Pp	S	S
1996		Pp	Pp	Pp	Pp	Pp	T	T
1997		Pp	M	M	M	M	M	M
1998		Pp	S	S	S	S	S	S
1999		Pp	T	T	T	T	T	T
2000		Pp	Pp	Pp	M	M	M	M
2001		Pp	Pp	Pp	S	S	S	S
2002		Pp	Pp	Pp	T	T	T	T
2003		Pp	M	M	M	M	M	M
2004		Pp	S	S	S	S	S	S
2005		Pp	T	T	T	T	T	T

definidos como sigue (**Tabla 1**): pastura permanente (T1), 50% del tiempo (tres años) agricultura y 50% del tiempo (tres años) pastura bajo LC (T2) y bajo SD (T3), 25% del tiempo (3 años) pastura y 75% del tiempo (9 años) agricultura bajo LC (T4) y bajo SD (T5) y agricultura permanente con LC (T6) (no utilizado en este trabajo ya que fue usado en otro (Studdert *et al.*, 2011)) y con SD (T7). La secuencia de cultivos de cosecha establecida para los períodos bajo agricultura fue maíz – soja (*Glycine max* (L. Merr.) – trigo todos realizados según las prácticas recomendadas para la región. La pastura del T1 estuvo constituida por festuca alta y trébol blanco y las de T2, T3, T4 y T5, por pasto ovillo, raigrás perenne, trébol rojo y trébol blanco. En esta fase del ensayo las pasturas no fueron ni pastoreadas ni cortadas. En los SC con LC las labores se realizaron de la misma manera que para la Fase 1. Bajo SD, los barbechos químicos se iniciaron no menos de tres meses antes de la siembra de los cultivos mediante una o dos aplicaciones de glifosato a las dosis recomendadas. Los niveles de fertilización nitrogenada fueron 0 (Sin N) y 120 (Con N) kg N ha⁻¹, aplicados anualmente bajo la forma de urea (46-0-0) al voleo a todos los cultivos en los períodos bajo agricultura, en el momento del ciclo de los cultivos que significara una máxima eficiencia de recuperación.

En otoño de 1981 a 1993 (Sin N) y de 1989 a 1993 (Con N) (Fase 1) se habían tomado muestras de suelo compuestas (0-15 cm) anualmente con un muestreador tubular de 2,5 cm de diámetro. En la Fase 2, las muestras de suelo compuestas habían sido extraídas de todas las unidades experimentales en otoño de cada año entre 1994 y 2006. Entre 1994 y 1996 se utilizó un muestreador cilíndrico de 2,5 cm de diámetro a 0-20 cm de profundidad en 1994 y a 0-5 y 5-20 cm de profundidad en 1995 y 1996. Entre 1997 y 2006 se utilizó un muestreador tubular de 5,5 cm de diámetro para extraer las muestras a 0-5 cm y 5-20 cm de profundidad. Esta última forma de muestreo permitió el cálculo de la densidad aparente para cada capa muestreada según lo propuesto por Agostini *et al.* (2014). Todas las

muestras de suelo habían sido secadas al aire a 30°C en estufa con circulación forzada de aire, molidas hasta pasar por un tamiz de 2,0 mm de apertura de malla, y almacenadas para su posterior análisis.

La concentración de COS se determinó por combustión húmeda con mantenimiento de la temperatura de reacción (120 °C durante 90 min para garantizar la oxidación del total del C orgánico) (Schlichting *et al.*, 1995). En los años en que el muestreo había sido realizado de 0-15 cm de profundidad (1981 a 1993), se asumió que la concentración de COS a 0-20 cm fue la misma que a 0-15 cm de profundidad. Los resultados de COS fueron expresados en masa (Mg C ha⁻¹) calculada con la densidad aparente determinada para cada capa (0-5 cm y 5-20 cm) (años 1997 a 2006). Para la obtención de la masa de COS en el resto de los años (1981-1993 y 1994-1996) se asumió un valor de densidad aparente de 1,25 Mg m⁻³, resultante del promedio de densidad aparente de varios años de determinaciones bajo distintos manejos en otros ensayos. En los años en que las muestras habían sido tomadas de 0-5 cm y de 5-20 cm (1995 a 2006) el valor de masa de COS a 0-20 cm de profundidad se calculó como suma de las masas en cada capa.

Modelo RothC y estimación del ingreso de C

Se utilizó la versión 26.3 del modelo RothC (RRes, 2007) para la capa de 0-20 cm del complejo bajo estudio, ejecutándolo de acuerdo con las instrucciones y especificaciones de los desarrolladores, sin ninguna alteración de su estructura y ni de sus parámetros. El modelo RothC es un modelo con paso de cálculo mensual y, por ello, para correrlo es necesario contar con información meteorológica mes a mes (temperatura media del aire (°C), precipitación (mm) y evapotranspiración (mm)) de cada año de simulación y de suelo (contenido de arcilla (%) y profundidad considerada (cm)). La variable de ingreso es el C que aportan las raíces y los residuos aéreos de los cultivos (Mg C ha⁻¹). La información meteorológica se obtuvo de los registros de la Estación Agrometeorológica de la UIB ubicada a aproximadamente 1000 m del ensayo. El nivel inicial (1976) de COS en la

capa de 0-20 cm fue de $37,2 \text{ g C kg}^{-1}$ ($92,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$) correspondiente a un largo periodo bajo pastura (Studdert *et al.*, 1997). A efectos de inicializar la simulación, el modelo fue corrido en “modo inverso” (RRes, 2007) a partir del COS inicial (Studdert *et al.*, 1997) a fin de determinar el tamaño inicial de cada uno de los compartimentos en que RothC divide el COS.

No se contó con la acumulación de biomasa aérea de los cultivos de cosecha. La masa de C aportada se estimó a partir de los rendimientos en grano (maíz, soja, trigo y girasol) y de tubérculos (papa). Se calculó la acumulación de materia seca (MS) aérea asumiendo índices de cosecha (IC) de 0,45, 0,40, 0,35, y 0,45 para trigo, soja, girasol y maíz, respectivamente (Studdert & Echeverría, 2000). Para calcular al aporte de raíces se consideró una relación biomasa radical + rizodeposición respecto a biomasa aérea total (BR/BAT) de 0,48, 0,38, 0,38, y 0,35 para trigo, soja, girasol y maíz, respectivamente (Buyanovsky & Wagner, 1997). Además, se consideró que la proporción de la biomasa subterránea en los 20 cm superiores del suelo fue de 0,90, 0,84, 0,84 y 0,91, respectivamente (Buyanovsky & Wagner, 1986). Para la estimación del aporte de C por la papa, se asumió un IC de 0,70 (Giletto, C., comunicación personal, 2009), un contenido de MS del tubérculo de 0,20 (Gonzalez, M.V., comunicación personal, 2009), un BR/BAT de 0,10 y que toda la biomasa radical se encontraba en los primeros 20 cm de suelo. Para el cálculo del aporte de C de avena y vicia se contó con la información de MS aérea acumulada (Mg ha^{-1}) y para el cálculo del aporte subterráneo (0-20 cm), se asumió una BR/BAT igual a la del trigo. Para la carga de la información al modelo, el C acumulado por los cultivos se dio por aportado en el mes de cosecha o finalización del cada cultivo.

Debido a que en el ensayo tampoco se determinó la acumulación de MS aérea de las pasturas, su producción se estimó a partir de evaluaciones realizadas en la zona en pasturas de similar conformación (Agnusdei *et al.*, 2001). La relación BR/BAT de las pasturas fue estimada a partir de lo informado por Bélanger *et al.* (1992) (0,34). El porcentaje de C en la biomasa vegetal

utilizado fue 43% (Sánchez *et al.*, 1996). A diferencia de los cultivos de cosecha, para la carga de la información al modelo de los periodos bajo pastura, el C acumulado se dio por aportado mes a mes de acuerdo con la distribución mensual de la producción de biomasa de las pasturas.

Evaluación del desempeño del modelo

El desempeño del modelo se evaluó a través del cálculo de indicadores estadísticos basados en la diferencia entre los valores de COS observados y simulados. Tales indicadores estadísticos fueron: media de las diferencias entre los valores observados y simulados (MBE, Mg C ha^{-1}), media de esas diferencias relativas a los correspondientes valores observados (MBRE, %) y su intervalo de confianza al 95% de probabilidad ($\text{MBRE}_{95\%}$, %) (Smith *et al.*, 1997), raíz cuadrada del cuadrado medio de la variación (RMSV, Mg C ha^{-1}) (Kobayashi & Salam, 2000) y del error (RMSE, Mg C ha^{-1}) (Fox, 1981) y su intervalo de confianza al 95% de probabilidad ($\text{RMSE}_{95\%}$, Mg C ha^{-1}) (Smith *et al.*, 1997). La RMSV indica la dispersión de los errores alrededor de su media (MBE) y el RMSE, la dispersión de aquéllos alrededor de cero y, con ello, de la comparación de ambos, se tiene una idea de la magnitud de la sub- o la sobreestimación del modelo, según correspondiera. Valores absolutos de MBRE y RMSE menores que $\text{MBRE}_{95\%}$ y $\text{RMSE}_{95\%}$, respectivamente, indican que los valores simulados se encuentran, en promedio, dentro del intervalo de confianza con 95% de probabilidad del contenido de COS observado. Se calculó también el RMSE relativo al promedio de los datos observados (RMSE_p , %). Los valores de RMSE y RMSV fueron calculados con el programa estadístico IRENE (Fila *et al.*, 2003). Los indicadores estadísticos mencionados fueron calculados en forma general y para los tratamientos individuales y agrupados según diferentes criterios. Se testeó la igualdad a 0 de MBE y MBRE a través del procedimiento T-TEST del programa estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute, 2009). Además, se realizó el análisis de regresión lineal simple entre los valores de COS observados (eje de las ordenadas) y los simulados (eje de las abscisas) (Piñeiro *et al.*, 2008) de los datos en general y agrupados. De todas las regre-

siones lineales, se evaluó la igualdad simultánea de la ordenada al origen y de la pendiente a cero y uno, respectivamente, con el programa estadístico IRENE (Fila *et al.*, 2003).

RESULTADOS

Desempeño general, por condición de fertilización y por fase

Los indicadores estadísticos del desempeño del modelo para todos los datos en conjunto se muestran en la sección A de la **Tabla 2**. La MBE y la MBRE presentaron valores levemente negativos, aunque significativamente diferentes de 0, indicando una pequeña sobreestimación (observados < simulados) por parte de RothC. Asimismo, MBRE y RMSE es-

tuvieron dentro del intervalo de confianza con 95% de probabilidad. No obstante, si bien la regresión lineal general de los valores observados versus los simulados fue altamente significativa ($p < 0,01$), el R^2 fue 0,45, es decir que la variación de los valores simulados explicó solamente el 45% de la de los observados. Además, la ordenada al origen y la pendiente no fueron simultáneamente iguales ($p > 0,05$) a 0 y 1, respectivamente.

Al discriminar entre dosis de N (**Tabla 2-A**), no se observaron tendencias diferenciales entre ellas y los indicadores fueron similares a los del análisis de todos los datos en conjunto y con patrones similares de desempeño. Asimismo, las regresiones lineales de observados vs. simulados

Tabla 2. Indicadores estadísticos de desempeño de RothC en el ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza. n: número de observaciones; MBE: media de las diferencias entre los valores observados y los simulados; MBRE: media de las diferencias entre los valores observados y los simulados relativas a los observados; $MBRE_{95\%}$: MBRE con una probabilidad de 95% (intervalo de confianza); RMSV: raíz cuadrada del cuadrado medio de la variación; RMSE: raíz cuadrada del cuadrado medio del error; $RMSE_{95\%}$: RMSE con una probabilidad del 95% (intervalo de confianza); RMSEp: RMSE relativo al promedio de los valores observados; Sin N: sin fertilizante nitrogenado; Con N: con fertilizante nitrogenado.

Table 2. Statistical indicators of RothC performance in the crop-pasture rotation and tillage system experiment. n: number of observations; MBE: mean of differences between observed and simulated values; MBRE: mean of differences between observed and simulated values relative to observe values; $MBRE_{95\%}$: MBRE with a 95% probability (confidence interval); RMSV: root mean square variation; RMSE: root mean square error; $RMSE_{95\%}$: RMSE with a 95% probability (confidence interval); RMSEp: RMSE relative to the mean of observed values; Sin N: without nitrogen fertilizer; Con N: with nitrogen fertilizer.

Tratamiento	n	MBE	MBRE	$MBRE_{95\%}$	RMSV	RMSE	$RMSE_{95\%}$	RMSEp
		Mg C ha ⁻¹	----- % -----		----- Mg C ha ⁻¹ -----			%
A) Todos los datos (Fase 1 y Fase 2, Tabla 1)								
Todos	230	-1,4±0,3**	-2,3±0,4**	7,1	4,9	5,1	9,1	6,6
Sin N	137	-0,6±0,4 ^{NS}	-1,3±0,6*	7,3	5,1	5,1	9,4	6,5
Con N	93	-2,5±0,5**	-3,7±0,6**	6,8	4,4	5,1	8,6	6,7
Fase 1	74	3,3±0,4**	3,7±0,5**	11,6	3,8	5,0	12,8	6,0
Fase 2	156	-3,6±0,3**	-5,1±0,4**	5,4	3,4	5,2	5,9	6,9
B) Períodos de agricultura y pastura en rotación (Fase 1 y Fase 2, Tabla 1)								
Agricultura	122	-1,8±0,5**	-2,8±0,7**	8,5	5,5	5,7	10,5	7,2
Pastura	53	0,7±0,6 ^{NS}	0,6±0,7 ^{NS}	10,7	4,8	4,9	8,8	6,2
C) Pastura continua (T1) y agricultura continua (T7) en la Fase 2 (Tabla 1)								
T1	24	-3,4±0,5**	-4,5±0,7**	4,9	2,4	4,2	5,5	5,6
T7	26	-1,5±0,6*	-2,3±0,9*	5,1	3,1	3,5	5,8	4,8
D) Períodos agrícolas bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en la Fase 2 (Tabla 1)								
LC	36	-6,0±0,5**	-8,6±0,7**	5,4	3,6	6,2	6,3	8,6
SD	34	-5,6±0,6**	-7,8±0,9**	4,7	3,7	6,1	5,6	8,2

^{NS}, *, **: Indican que las diferencias de MBE o MBRE respecto al 0 fueron no significativas ($p > 0,05$), significativas ($p < 0,05$) o altamente significativas ($p < 0,01$)

fueron altamente significativas ($p < 0,01$), y las ordenadas al origen y las pendientes no fueron simultáneamente iguales ($p > 0,05$) a 0 y 1, respectivamente. Los R^2 obtenidos para Sin N y Con N fueron 0,60 y 0,17, respectivamente.

Sin embargo, al analizar cada fase por separado (sin distinción de tratamientos), hubo comportamientos diferentes entre ellas (**Tabla 2-A**). La MBE y la MBRE de la Fase 1 tuvieron valores positivos (subestimación por parte del modelo). Por otro lado, en la Fase 2 ambos indicadores tuvieron valores negativos (sobrestimación por parte del modelo). En ambas fases MBE y MBRE fueron diferentes de 0 ($p < 0,01$) y MBRE y RMSE estuvieron dentro del intervalo de confianza con 95% de probabilidad.

Comportamiento de la simulación en los periodos bajo agricultura y bajo pastura

En la sección B de la **Tabla 2** se presentan los indicadores estadísticos para los periodos agrícolas y bajo pastura de las Fases 1 y 2. Este análisis no incluyó los tratamientos T1 (pastura continua) y T7 (agricultura continua) de la Fase 2 (**Tabla 1**) porque en esta instancia se evaluó el comportamiento de RothC bajo ambas situaciones de uso,

pero en condiciones de rotación mixta (alternancia de periodos de agricultura y de pastura). Durante los periodos bajo agricultura RothC tendió a sobreestimar dado que los valores de MBE y MBRE fueron levemente negativos, aunque significativamente diferentes de 0 ($p < 0,01$) (**Tabla 2-B**). No obstante, durante los periodos bajo pastura el modelo tendió a subestimar (observados $>$ simulados) ya que los valores de MBE y MBRE fueron levemente positivos y estadísticamente iguales a 0 (**Tabla 2-B**). Los valores de MBRE y de RMSE estuvieron incluidos dentro del intervalo de confianza con 95% de probabilidad (**Tabla 2-B**).

En la **Figura 1** se presenta la MBRE de cada uno de los tratamientos de la Fase 1, sin distinguir entre actividades (*i.e.* agricultura o pastura) ni entre niveles de fertilización nitrogenada (*i.e.* Con N o Sin N). Todos los valores de MBRE estuvieron dentro del intervalo de confianza con 95% de probabilidad (**Figura 1**). Asimismo, sólo los MBRE de los tratamientos T1 y T5 fueron estadísticamente iguales a 0 ($p > 0,05$). En la **Figura 2** se presentan los cambios en el tiempo del COS simulado y del observado para todos los tratamientos durante la Fase 1. En la **Figura 2** se

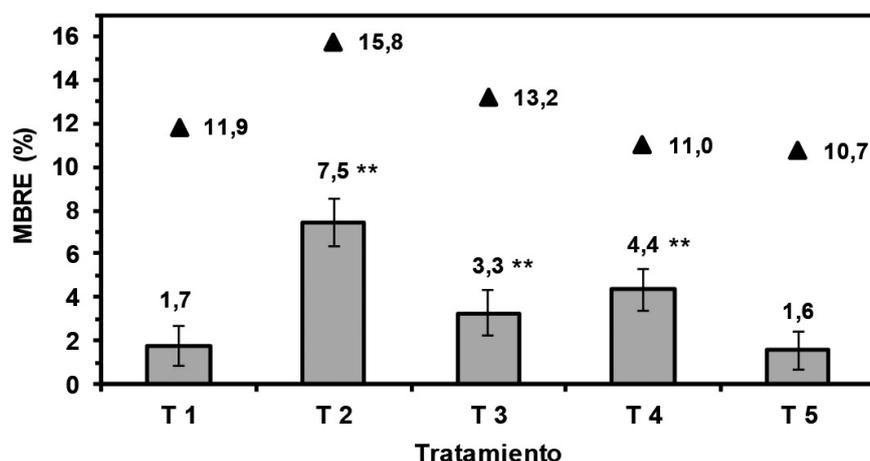


Figura 1. Media de las diferencias observado menos simulado relativa a observado (MBRE), de cada tratamiento de la Fase 1 del ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza. T1: tratamiento uno; T2: tratamiento dos; T3: tratamiento tres; T4: tratamiento cuatro; T5: tratamiento cinco (**Tabla 1**). Las barras en las columnas indican error estándar de la media. **: indica diferencia altamente significativa ($p < 0,01$) respecto a 0 de los MBRE por tratamiento. Los triángulos negros indican el límite superior del intervalo de confianza con una probabilidad del 95%.

Figure 1. Observed mean minus simulated values relative to observed values (MBRE) of each Phase 1 treatment of the crop-pasture rotation and tillage system experiment. T1: treatment one; T2: treatment two; T3: treatment three; T4: treatment four; T5: treatment five (**Table 1**). Vertical bars in each column indicate standard error of the mean. **: indicate highly significant difference ($p < 0.01$) of MBRE respect to 0 for each treatment. Black triangles indicate upper limit of the confidence interval at 95% probability.

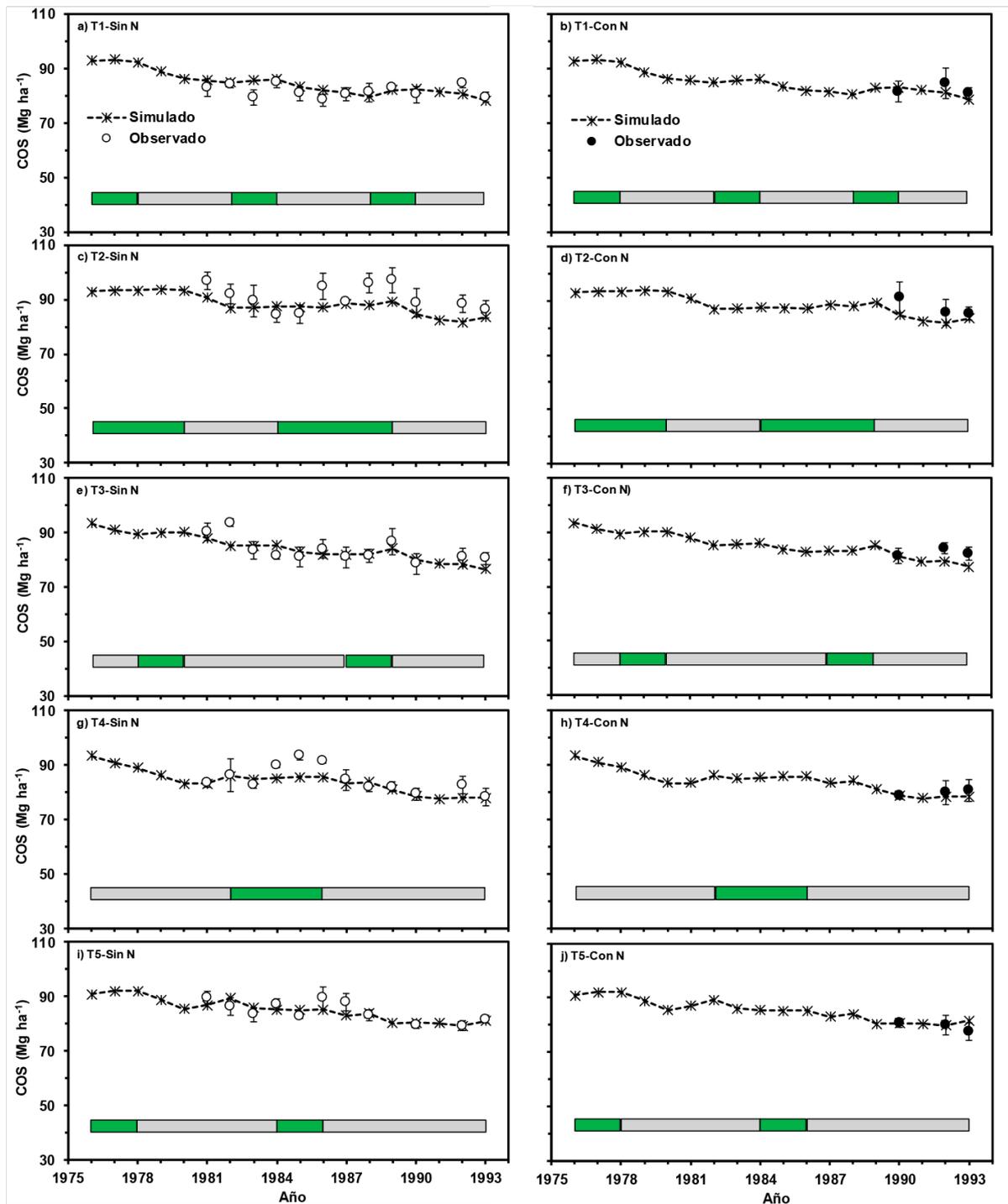


Figura 2. Valores de carbono orgánico del suelo (COS) simulado y observado en función del tiempo, por tratamientos de la Fase 1 del ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza (Tabla 1). Las barras en los símbolos de los valores observados indican el error estándar de la media de los valores observados. Las barras grises en la base de cada gráfico indican período agrícola y las verdes indican período de pastura (Tabla 1). T1: tratamiento uno; T2: tratamiento dos; T3: tratamiento tres; T4: tratamiento cuatro; T5: tratamiento cinco (Tabla 1); Sin N: sin fertilizante nitrogenado; Con N: con fertilizante nitrogenado.

Figure 2. Simulated and observed soil organic carbon (COS) values as a function of time of all Phase 1 treatments of the crop-pasture rotation and tillage system experiment (Table 1). Vertical bars in the symbols indicate standard error of the mean of observed values. Gray and green horizontal bars at the bottom of each plot indicate period under crops and under pasture, respectively (Table 1). T1: treatment one; T2: treatment two; T3: treatment three; T4: treatment four; T5: treatment five (Table 1); Sin N: without nitrogen fertilizer; Con N: with nitrogen fertilizer.

muestran por separado las situaciones Sin N y Con N para cada tratamiento, pero los indicadores estadísticos (datos no mostrados) fueron similares entre ambas situaciones. Los tratamientos T1, T3 y T5 presentaron pasturas “cortas” (aproximadamente 2 años, **Tabla 1**, **Figura 2**) y sus MBRE fueron menores (**Figura 1**) que los de T2 y T4 (**Figura 1**), que presentaron pasturas “largas” (entre 4 y 5 años, **Tabla 1**, **Figura 2**). Los MBRE de los períodos agrícolas de T1, T3 y T5 fueron $2,3 \pm 1,0$, $3,2 \pm 1,2$ y $1,3 \pm 0,9\%$, respectivamente, mientras que bajo pasturas fueron de $0,2 \pm 2,1$, $3,5 \pm 2,4$ y $3,1 \pm 4,1\%$, respectivamente. Sin embargo, para T2 y T4, los MBRE bajo agricultura fueron $7,1 \pm 1,2$ y $3,2 \pm 0,7\%$, respectivamente, y bajo pastura fueron $8,2 \pm 2,6$ y $7,4 \pm 2,7\%$, respectivamente. Estos resultados muestran que durante la Fase 1 RothC tendió a subestimar el COS y, además, mostró un desempeño menos alentador para la simulación en las rotaciones con períodos de pastura de más de 2 años.

En la **Figura 3** se presenta la MBRE de cada uno de los tratamientos de la Fase 2 (exceptuando T1 y T7), sin distinguir entre actividades ni en-

tre niveles de fertilización nitrogenada. Todas las MBRE fueron negativas lo que indica que en la Fase 2 RothC tendió a sobreestimar el COS (observados < simulados). Además, todos los MBRE fueron altamente significativamente diferentes de 0 ($p < 0,01$) y sólo los MBRE de T2 y T3 estuvieron dentro o en el límite del intervalo de confianza al 95% de probabilidad (**Figura 3**). En la **Figura 4** se presenta el COS simulado y el observado a lo largo de los años de simulación para T2, T3, T4 y T5 en la Fase 2. En la **Figura 4** se muestran por separado las situaciones Sin N y Con N para cada tratamiento, pero los indicadores estadísticos (datos no mostrados) fueron similares entre ambas situaciones. Estos tratamientos incluyeron pasturas de tres años de duración (**Tabla 1**) y difirieron en la duración de los períodos agrícolas (3 años en T2 y T3 (dos veces) y 9 años en T4 y T5, **Tabla 1**, **Figura 4**). Las MBRE para los períodos de agricultura de esos cuatro tratamientos fueron $-8,5 \pm 1,1$, $-7,5 \pm 1,7$, $-8,9 \pm 1,0$ y $-6,5 \pm 0,9\%$, respectivamente. Cabe resaltar que las MBRE de los períodos bajo agricultura fueron similares entre tratamientos independientemente de que estuvieran bajo LC (T2

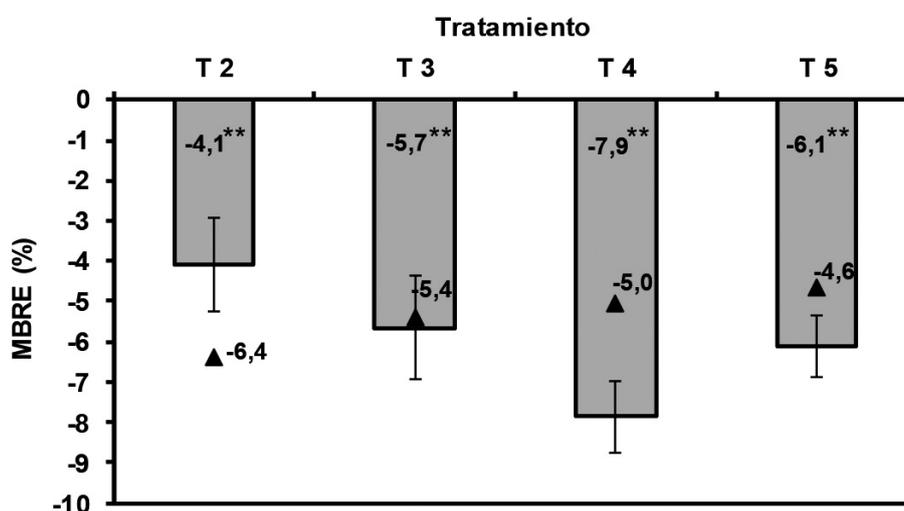


Figura 3. Media de las diferencias observado menos simulado relativa a observado (MBRE), de cada tratamiento de la Fase 2 del ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza. T2: tratamiento dos; T3: tratamiento tres; T4: tratamiento cuatro; T5: tratamiento cinco (**Tabla 1**). Las barras en las columnas indican error estándar de la media. **: indica diferencia altamente significativa ($p < 0,01$) respecto a 0 de los MBRE por tratamiento. Los triángulos negros indican el límite inferior del intervalo de confianza con una probabilidad del 95%.

Figure 3. Observed mean minus simulated values relative to observed values (MBRE) of each Phase 2 treatment of the crop-pasture rotation and tillage system experiment. T2: treatment two; T3: treatment three; T4: treatment four; T5: treatment five (**Table 1**). Vertical bars in each column indicate standard error of the mean. **: indicate highly significant difference ($p < 0.01$) of MBRE respect to 0 for each treatment. Black triangles indicate lower limit of the confidence interval at 95% probability.

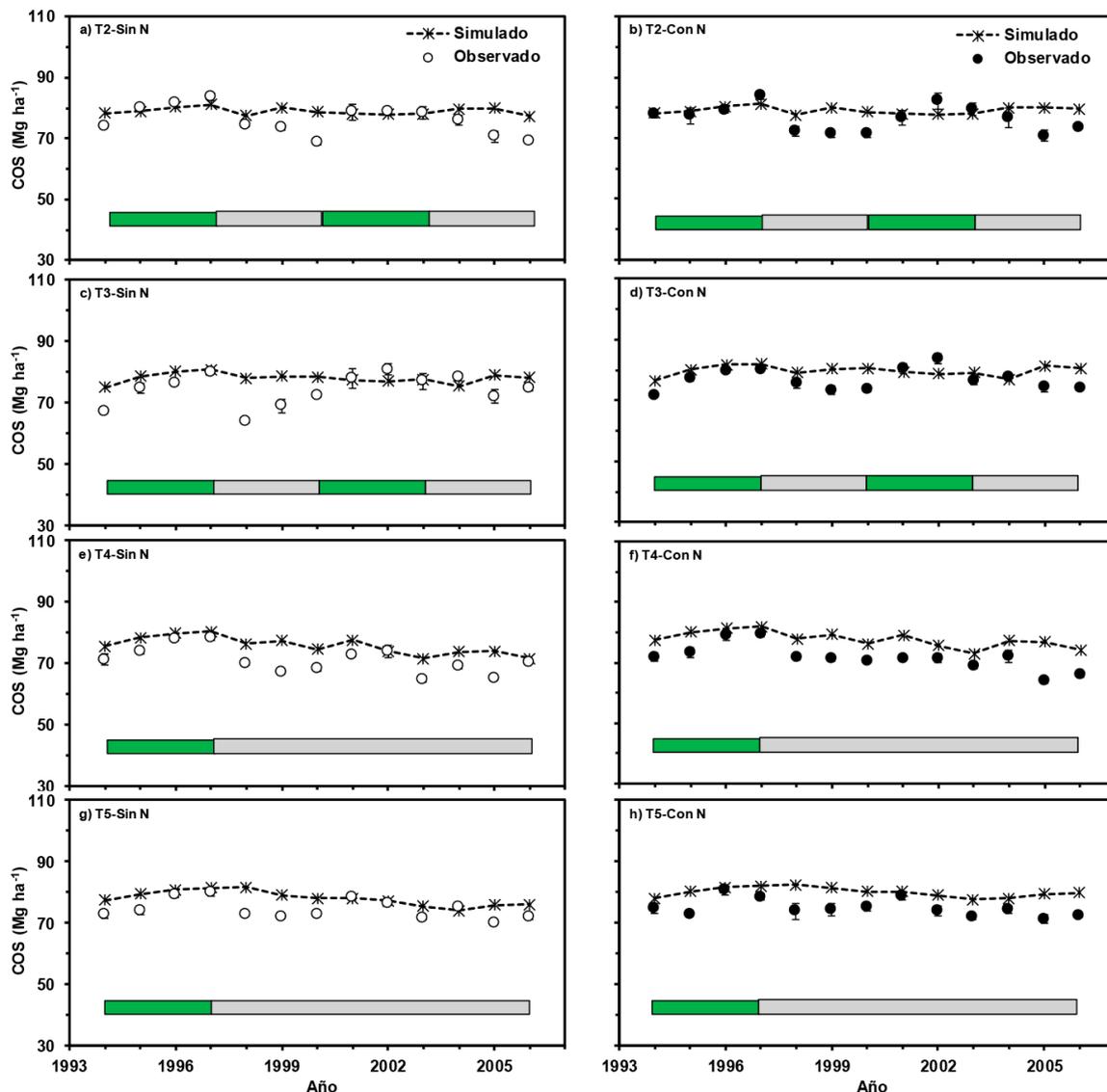


Figura 4. Valores de carbono orgánico del suelo (COS) simulado y observado en función del tiempo, por tratamientos de la Fase 2 del ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza (**Tabla 1**). Las barras en los símbolos de los valores observados indican el error estándar de la media de los valores observados. Las barras grises en la base de cada gráfico indican período agrícola y las verdes indican período de pastura (**Tabla 1**). T1: tratamiento uno; T2: tratamiento dos; T3: tratamiento tres; T4: tratamiento cuatro; T5: tratamiento cinco (**Tabla 1**). Sin N: sin fertilizante nitrogenado; Con N: con fertilizante nitrogenado.

Figure 4. Simulated and observed soil organic carbon (COS) values as a function of time of all Phase 2 treatments of the crop-pasture rotation and tillage system experiment (**Table 1**). Vertical bars in the symbols indicate standard error of the mean of observed values. Gray and green horizontal bars at the bottom of each plot indicate period under crops and under pasture, respectively (**Table 1**). T2: treatment two; T3: treatment three; T4: treatment four; T5: treatment five (**Table 1**); Sin N: without nitrogen fertilizer; Con N: with nitrogen fertilizer

y T4) o bajo SD (T3 y T5) y de que contemplaran períodos más largos o más cortos de esta actividad. Por otro lado, para los períodos bajo pastura las MBRE fueron $-1,1 \pm 0,6$, $-1,2 \pm 1,0$, $-4,4 \pm 1,1$ y $-4,6 \pm 1,4\%$ respectivamente. Al igual que en la Fase 1, los desvíos relativos de la simulación de COS con RothC (MBRE) mostraron menores

valores absolutos en los períodos bajo pastura que en aquéllos bajo agricultura. Además, en estos últimos no hubo diferencia entre SD y LC.

En la sección C de la **Tabla 2** se presentan los indicadores estadísticos correspondientes a los tratamientos T1 (pastura continua) y T7 (agricul-

tura continua bajo SD) de la Fase 2 (**Tabla 1**). Los indicadores estadísticos en la **Tabla 2-C** muestran que RothC tuvo un muy buen desempeño en la simulación de los cambios de COS bajo ambos tratamientos. Dichos resultados se tradujeron en una gran similitud entre los valores simulados y observados de COS a lo largo del tiempo presentados en la **Figura 5**. En esta Figura se muestran por separado las situaciones Sin N y Con N para cada tratamiento, pero los indicadores estadísticos (datos no mostrados) fueron similares entre ambas situaciones.

Comportamiento de la simulación según tipo de labranza

En la sección D de la **Tabla 2** se muestran los indicadores estadísticos para los periodos agrícolas bajo LC (T2 y T4, **Tabla 1**, **Figura 4**) y SD (T3 y T5 sin tener en cuenta T7, **Tabla 1**, **Figura 4**) de la Fase 2. Los indicadores estadísticos bajo ambos sistemas de labranza fueron similares. Cabe resaltar que los indicadores estadísticos para T7 (**Tabla 2-C**) fueron mejores que los obtenidos para los tratamientos bajo SD en rotación mixta (**Tabla 2-D**). Esto indicaría un mejor comportamiento del modelo para simular cambios del COS en situaciones de agricultura continua bajo SD, pero sin diferencias entre labranzas en condiciones de rotación mixta.

DISCUSIÓN

El desempeño general de RothC para simular cambios del COS bajo distintas situaciones de uso y manejo del suelo fue satisfactorio. El promedio general de stock de COS observado fue 77,6 Mg C ha⁻¹, mientras que el de los valores simulados fue 79,0 Mg C ha⁻¹. Es decir, RothC estimó un contenido promedio de COS sólo 1,4 Mg C ha⁻¹ superior a los valores observados en los primeros 20 cm del perfil de suelo, a pesar de la diversidad de situaciones involucradas (combinaciones de cultivos, sistemas de labranza, condición de disponibilidad de N). Esto difiere de lo reportado por Studdert *et al.* (2011) al validar RothC para el SEB bajo agricultura continua y LC ya que estos autores mostraron una leve subestimación por parte del modelo, aunque también de una baja magnitud.

Los valores de MBE y MBRE generales fueron bajos y cercanos a 0 a pesar de que en la mayoría de los casos fueron estadísticamente diferentes de ese valor ($p > 0,05$ o $p < 0,01$) (**Tabla 2**). Las MBE para los distintos agrupamientos de tratamientos oscilaron entre - 6,0 y 3,3 Mg C ha⁻¹ y las MBRE entre - 8,6 y 3,7 %. Asimismo, las MBRE de los tratamientos individuales sin distinguir actividad (*i.e.* pastura o cultivos agrícolas), condición de fertilización (*i.e.* Sin N o Con N) o sistema de labranza (*i.e.* LC o SD) también estuvieron dentro de dicho rango (**Figuras 1** y 3). En general, las MBRE de los tratamientos agrupados estuvieron dentro del intervalo de confianza con una probabilidad del 95% (**Tabla 2**), lo que indica que los desvíos de las simulaciones no superan dicho intervalo de confianza y, por lo tanto, son aceptables (Smith *et al.*, 1997). Las MBRE de los periodos agrícolas en los tratamientos con rotaciones mixtas (T2, T3, T4 y T5) de la Fase 2 presentaron valores absolutos mayores que MBRE_{95%} tanto bajo LC como bajo SD (**Tabla 2-D**).

Comparando el desempeño de distintos modelos de simulación de COS, Smith *et al.* (1997) indicaron que los modelos con mejor comportamiento eran aquellos que presentaban valores de RMSE entre 6,5 y 10,0 Mg C ha⁻¹ o menores y RMSEp entre 5,0 y 8,0% o menores. En este trabajo, todos los valores de RMSE obtenidos (**Tabla 2**) oscilaron entre 3,5 y 6,3 Mg C ha⁻¹ y los de RMSEp estuvieron, en su mayoría, dentro del rango indicado por Smith *et al.* (1997). Sólo los RMSEp de los periodos agrícolas de los tratamientos con rotaciones mixtas de la Fase 2 estuvieron levemente por encima del máximo indicado por aquellos autores (**Tabla 2-D**).

Del análisis del comportamiento de RothC para simular cambios en el COS bajo diferente condición de disponibilidad de N (Sin N y Con N, **Tabla 2-A**) se desprende que el desempeño del modelo no fue diferencial entre ambos tratamientos. Los indicadores en la **Tabla 2-A** muestran que, tanto Sin N como Con N, RothC mostró un desempeño aceptable. No obstante, en las situaciones Con N en general y por tratamiento (datos no mostrados), los valores de los indicadores están algo más alejados de los ideales. Esto es coincidente

con Studdert *et al.* (2011) quienes también mostraron un relativamente mejor comportamiento de RothC en las situaciones Sin N bajo LC y agricultura continua. El modelo no incluye ningún factor que contemple el efecto de la fertilización nitrogenada y su incidencia sólo sería reflejada en el diferente ingreso de C al suelo por una mayor acumulación de biomasa. Esta característica del modelo podría estar afectando su desempeño debido a que existe evidencia de que los contenidos de N de los residuos y del suelo no sólo afectan la tasa a la cual aquéllos se descomponen y humifican (Melchiori *et al.*, 2014), sino que también altera las tasas de mineralización de COS y, así, su dinámica. Se ha informado que la fertilización con N podría provocar un incremento de la actividad de los microorganismos del suelo, induciendo a una mayor descomposición de los residuos de los cultivos y del COS, incrementando las tasas de mineralización (Khan *et al.*, 2007; Poirier *et al.*, 2009) y esto no es contemplado por RothC en las condiciones en que fue utilizado.

Por otro lado, si bien el modelo fue concebido para simular la variación de COS en suelos bajo agricultura, los indicadores mostrados en la **Tabla 2-B y 2-C** muestran que RothC tuvo un comportamiento aceptable bajo agricultura y bajo pastura por separado y, además, no difirieron en gran medida de los valores generales (**Tabla 2-A**), ya sea en rotación mixta (**Tabla 2-B**) o en agricultura/pastura continuas (**Tabla 2-C**). Todos los indicadores estuvieron dentro de los rangos reportados como aceptables (Smith *et al.*, 1997), incluso teniendo en cuenta que en los periodos agrícolas no se distinguió entre LC y SD. Además, los valores de RMSE y los absolutos de MBRE estuvieron dentro del intervalo de confianza con una probabilidad del 95%. No obstante, al analizar los MBRE para los tratamientos individuales (**Figuras 1 y 3**), se pueden observar diferencias entre ellos. Coincidiendo con lo mostrado en la **Tabla 2-A** para la Fase 1 del ensayo (**Tabla 1**), todos los tratamientos mostraron MBRE dentro del intervalo de confianza con una probabilidad del 95% pero positivos (subestimación, **Figura 1**), lo que coincide con Studdert *et al.* (2011). Por otro lado, los indicadores para la Fase 2 tanto genera-

les (**Tabla 2-A**) como los MBRE por tratamientos (**Figura 3**) mostraron sobreestimación por parte de RothC, también coincidente con lo informado por Studdert *et al.* (2011) para el único tratamiento de esa Fase que evaluaron (T6, no utilizado en este trabajo). El modelo simuló algo mejor los cambios en el COS en los periodos agrícolas de la Fase 1 (siempre bajo LC) que en el conjunto de la Fase 2 (algunas situaciones bajo LC y otras bajo SD). Esto podría estar relacionado con los efectos diferenciales de los sistemas de labranza en rotación mixta y cómo afecta cada uno la dinámica del COS luego de un período de recuperación bajo pastura (Siri Prieto & Ernst, 2010).

No se cuenta con elementos que permitan explicar el por qué RothC subestimó y sobreestimó el COS en los periodos agrícolas de las Fases 1 y 2, respectivamente, pero es muy probable que tenga que ver con forma en que se generó la información de ingreso del C de los cultivos al sistema. En la Fase 1 la variedad de cultivos involucrados en las secuencias en los periodos agrícolas fue mayor que en la Fase 2. En esta última sólo se incluyó maíz, soja y trigo, en ese orden y en los periodos agrícolas de todos los tratamientos igual (**Tabla 1**). No obstante, en los periodos agrícolas de la Fase 1 hubo maíz, girasol, trigo, papa y avena como abono verde y sin un patrón de secuencia común a todos los tratamientos (**Tabla 1**). Asimismo, el mecanismo de estimación de la cantidad de C aportado al suelo por los cultivos (a partir de los rendimientos en órgano de cosecha y con un IC uniforme para cada cultivo), puede haber generado errores (Moreno *et al.*, 2016) y éstos pueden haberse visto potenciados o compensados según cual fuera la secuencia de cultivos empleada. La posibilidad de estimación del C aportado por los cultivos es uno de los puntos débiles para la implementación de este (Studdert *et al.*, 2011) y otros modelos (Moreno *et al.*, 2016) sencillos para la simulación del COS y requiere de un mayor ajuste. Sin embargo, a pesar de lo dicho, los indicadores para T7 (**Tabla 2-C**) muestran que con la secuencia maíz-soja-trigo y bajo SD, el modelo funcionó adecuadamente (**Figura 5**) y, si bien con algo de sobreestimación, los valores simulados y los indicadores fueron muy promisorios.

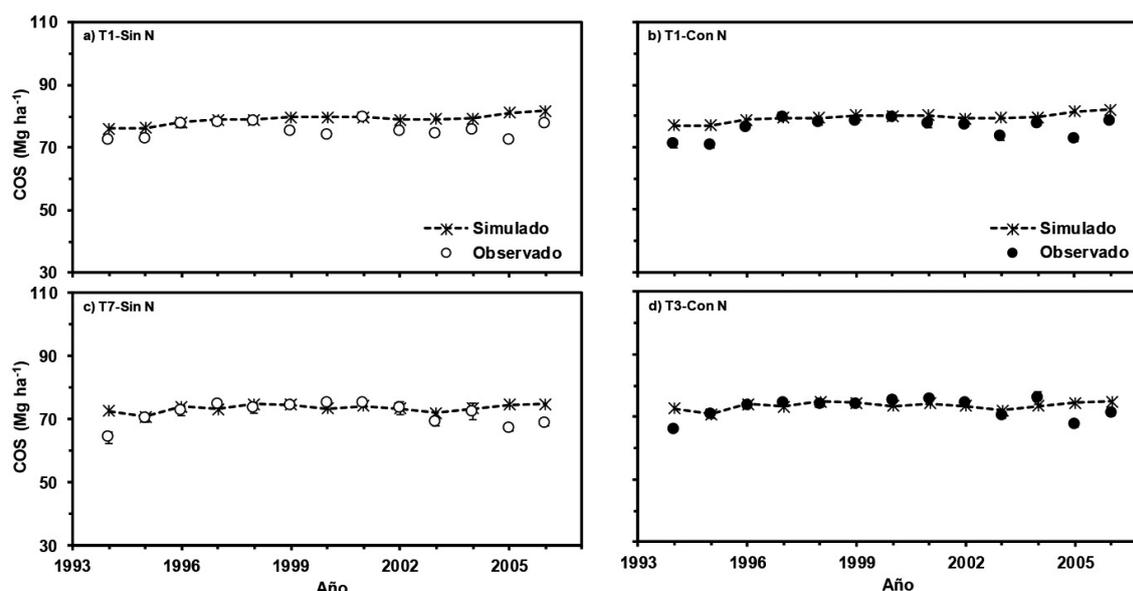


Figura 5. Valores de carbono orgánico del suelo (COS) simulado y observado en función del tiempo, en los tratamientos de pastura continua (T1, **Tabla 1**) y de agricultura continua bajo siembra directa (T7, **Tabla 1**) en la Fase 2 del ensayo de rotaciones mixtas y sistemas de labranza. Las barras en los símbolos de los valores observados indican el error estándar de la media de los valores observados. Sin N: sin fertilizante nitrogenado; Con N: con fertilizante nitrogenado.

Figure 5. Simulated and observed soil organic carbon (COS) values as a function of time of treatments under continuous pasture (T1, **Table 1**) and under continuous cropping (T7, **Table 1**) of Phase 2 of the crop-pasture rotation and tillage system experiment. Vertical bars in the symbols indicate standard error of the mean of observed values. Sin N: without nitrogen fertilizer; Con N: with nitrogen fertilizer de 2 años.

En los periodos bajo pastura la tendencia a la sub – y sobreestimación entre Fases se manifestó de la misma manera que para los periodos agrícolas, pero en menor magnitud. Todos los indicadores bajo pastura estuvieron dentro de los límites reportados por Smith *et al.* (1997) y dentro de los intervalos de confianza con 95% de probabilidad. Todo esto indica que RothC puede ser utilizado en suelos del SEB bajo pastura. No obstante, los indicadores se alejaron algo de los ideales en los tratamientos con rotaciones mixtas con pasturas de más de dos años en la Fase 1 (T2 y T4) y en aquéllos con pasturas de tres años, pero asociados a periodos agrícolas previos más largos (T4 (bajo LC) y T5 (bajo SD) de la Fase 2, **Tabla 1**). Studdert *et al.* (2011), obtuvieron valores de MBE y MBRE de 1,03 Mg C ha⁻¹ y 1,04%, respectivamente y de RMSE de 4,07 Mg C ha⁻¹ y de RMSV de 3,94 Mg C ha⁻¹ para los tratamientos de la Fase 1 bajo agricultura continua. Estos valores muestran un mejor desempeño que los indicadores estadísticos presentados aquí bajo LC en rotaciones mixtas, lo que pone en evidencia un desempeño menos favorable del modelo en estas últimas

condiciones. Sin embargo, al igual que para agricultura continua, los indicadores para pastura continua (T1) (**Tabla 2-C**) muestran que, en esas condiciones, el modelo funcionó adecuadamente (**Figura 5**) y, si bien con algo de sobreestimación, los valores simulados y los indicadores fueron también muy promisorios. De todas maneras, la producción de biomasa aérea y radical por parte de las pasturas fue estimada a partir de la bibliografía. No fue posible relacionar la estimación de la magnitud de la biomasa producida con las condiciones meteorológicas de los años considerados en las simulaciones. Por ello, quizás la estimación del aporte de C por las pasturas puede no haber sido fiel a lo que realmente aportaron cada año. Nuevamente, la estimación del “input” de C es también un punto débil y crucial para las pasturas, lo que debería ser mejorado. Con ello, posiblemente podrían lograrse aún mejores ajustes entre valores de COS observados y simulados bajo pastura.

El modelo RothC fue elaborado para simular la variación de COS en situaciones bajo laboreo.

En el SEB se ha informado que no se han verificado diferencias de importancia en la variación del COS en la capa arable entre situaciones de secuencias de cultivos similares bajo SD y LC (Domínguez *et al.*, 2009; Studdert *et al.*, 2018). Los cambios de COS en ambos casos se mostraron más dependientes de la cantidad de C aportada por los cultivos que de la labranza (Domínguez *et al.*, 2009). En este trabajo, los indicadores de desempeño del modelo (**Tabla 2-D**) mostraron valores similares entre sistemas de labranza, pero en ambos casos los RMSEp estuvieron levemente por encima (**Tabla 2-D**) de los valores que Smith *et al.* (1997) consideraron indicaban un adecuado desempeño de modelos de simulación de COS (5,0 y 8,0%). Asimismo, el valor absoluto de ambos MBRE fue mayor que el $MBRE_{95\%}$. Sin embargo, los RMSE estuvieron por debajo de los valores que aquellos autores indicaron como aceptables (entre 6,5 y 10,0 Mg C ha⁻¹) y cercanos al límite del intervalo de confianza con 95% de probabilidad. Si bien en los periodos de agricultura de la Fase 2 el desempeño del RothC estuvo algo más alejado de lo ideal, es de destacar que comparando T2 (LC) vs T3 (SD) y T4 (LC) vs T5 (SD) (**Figuras 3** y 4), no hubo ninguna diferencia entre sistemas de labranza en la calidad de la simulación del cambio en COS.

Comparando el desempeño de RothC en T7 (SD) en la Fase 2 (**Tabla 2-C**) con el informado por Studdert *et al.* (2011) para agricultura continua con la misma secuencia de cultivos (maíz-soja-trigo, **Tabla 1**) pero bajo LC (T6, Studdert *et al.*, 2011), los indicadores de ambos tratamientos fueron similares. Los indicadores para T7 (**Tabla 2-C**) y para T6-2 (Studdert *et al.*, 2011) mostraron un muy buen comportamiento del modelo independientemente del sistema de labranza. Lo mostrado en la **Tabla 2-C** y **2-D** demuestra que RothC simuló de igual manera los cambios en COS bajo LC y bajo SD. Liu *et al.* (2009) también reportaron escasa diferencia en la simulación de COS por RothC bajo LC y SD, pero, para las condiciones del sur de Australia en que trabajaron, los más bajos RMSE los encontraron cuando dejaban entre el 16 y el 26% del C de residuos aéreos de los cultivos.

CONCLUSIONES

Para las condiciones edafoclimáticas bajo las que evaluó el desempeño de RothC, se puede concluir que la evidencia generada no fue suficiente para rechazar la primera hipótesis. Se ha demostrado que el modelo es capaz de simular aceptablemente los cambios en el COS cuando se incluyen pasturas en la rotación de cultivos. Asimismo, tampoco se han reunido evidencias suficientes para rechazar la segunda hipótesis. El modelo RothC fue capaz de simular satisfactoriamente cambios en el COS cuando el sistema de labranza utilizado es SD. No obstante, a pesar de lo dicho, se comprobaron diferencias del comportamiento del modelo según las características de las combinaciones de los factores de tratamiento (sistema de labranza, combinación de cultivos, fertilización nitrogenada) en ambas Fases. Es posible que tales desviaciones en el desempeño del modelo no necesariamente puedan ser todas atribuidas a RothC. Es cierto que posiblemente sea necesario ajustar los coeficientes para adaptar mejor el modelo a condiciones de no laboreo (*i.e.* SD o pasturas) y generar alguno que tengan en cuenta el efecto de la fertilización nitrogenada. No obstante, es muy probable que el origen la información de entrada de C (estimada a partir de rendimientos en órgano de cosecha o la bibliografía), haya tenido una elevada incidencia. Sin embargo, a pesar de ello, Roth C se mostró como una herramienta que puede ser utilizada como apoyo a la planificación de los SC en el SEB.

AGRADECIMIENTOS

La información presentada en este trabajo forma parte de la Tesis de Grado de la primera autora presentada para obtener su título de Ingeniera Agrónoma en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (a través del proyecto PICT 1092-2012) y la Universidad Nacional de Mar del Plata (a través del proyecto AGR570/18).

BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2016. Estimación de superficie en siembra directa <http://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2016/10/Estimación-de-superficien-en-SD-1.pdf>. Último acceso octubre de 2017.
- Agnusdei, MG; MR Colabelli & RC Fernández Grecco. 2001. Crecimiento estacional de forraje de pasturas y pastizales naturales del Sudeste Bonaerense. INTA, Estación Experimental Balcarce, Argentina. Boletín Técnico N° 152. 31 pp.
- Agostini, MA; MG Monterubbianesi; GA Studdert & S Maurette. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. Ciencia del Suelo 32:171-176.
- Bélanger, G; F Gastal & FR Warembourg. 1992. The effects of nitrogen fertilization and the growing season on carbon partitioning in a sward of tall fescue (*Festuca arundinacea* Scherb.). Ann. Bot. 70:239-244.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1986. Post-harvest residue input to cropland. Plant Soil 93:57-65.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1997. Crop residue input to soil organic matter in the Sanborn field. In Paul E.A. (ed.) Soil organic matter in temperate ecosystems: Long-term experiments in North America. Pp. 73-83. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.
- Domínguez, GF; NV Diovisalvi; GA Studdert & MG Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern pampas. Soil Till. Res. 102:93-100.
- Doran, J & R Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. Appl Soil Ecol. 15:3-11.
- Faloon, P & P Smith. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. Soil Use Manage. 18:101-111.
- Fila, G; G Bellocchi; M Acustis & M Donatelli. 2003. IRENE: a software to evaluate model performance. Europ. J. Agron. 18:369-372.
- Fox, DG. 1981. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 62:599-609.
- Franzluëbbers, A; J Sawchik & MA Taboada. 2014. Agro-economic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. Agric. Ecosys. Environ. 190:18-26.
- INTA. 1979. Carta de suelos de la República Argentina. Carta Número 3757. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina. 76 pp.
- Janzen, HH. 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? Soil Biol. Biochem. 38:419-424.
- Jenkinson, DS; PBS Hart; JH Rayner & LC Parry. 1987. Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments. INTECOL Bull. 15:1-8.
- Jenkinson, DS; DE Adams & A Wild. 1991. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. Nature 351:304-306.
- Jørgensen, SE & G Bendoricchio. 2001. Introduction. In: Jørgensen, SE & G Bendoricchio (eds.) Fundamentals of ecological modelling. Pp. 1-18. Elsevier Science B.V., Kidlington, Reino Unido.
- Khan, SA; RL Mulvaney; TR Ellsworth & CW Boast. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration, J. Environ. Qual. 36:1821-1832.
- Kobayashi, K & MU Salam. 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. Agron. J. 92:345-352.
- Lal, R. 2010. Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. Crop Sci. 50(Supplement):S-120-S-131.
- Liu, DL; KY Chan & MK Conyers. 2009. Simulation of soil organic carbon under different tillage and stubble management practices using the Rothamsted carbon model. Soil Tillage Res. 104:65-73.
- Liu, DL; KY Chan; MK Conyers; G Li & GJ Poile. 2011. Simulation of soil organic carbon dynamics under different pasture managements using the RothC carbon model. Geoderma 165:69-77.
- Martínez, EH; JPE Fuentes & EH Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 8:68-96.
- Melchiori, RJM; LE Novelli; VC Gregorutti & OP Caviglia. 2014. Stover quality and soil organic carbon in long-term nitrogen-fertilized maize. Agron. J. 106:1709-1716.
- Moreno, R; GA Studdert; MG Monterubbianesi & AI Irigoyen. 2016. Soil organic carbon changes simulated with the AMG model in a high-organic-matter Mollisol. Spanish J. Soil Sci. 6:212-229.
- Piñeiro, G; S Perelman; JP Guerschman & JM Paruelo. 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? Ecol. Model. 216:316-322.
- Poirier, V; DA Angers; P Rochette; MH Chantigny; N Ziadi; G Tremblay; J. Fortin. 2009. Interactive effects of tillage and mineral fertilization on soil carbon profiles. Soil Sci. Soc. Am. J. 73:255-261.
- Powlson, DS; CM Stirling; ML Jat; BG Gerard; CA Palm; PA Sanchez & KG Cassman. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. Nature Climate Ch. 4:678-683.

- Puget, P & R Lal. 2005. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil Tillage Res.* 80:201-213.
- Quiroga, RA & GA Studdert. 2015. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica, dos aspectos clave. En: Echeverría, HE & FO García (eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da Edición. Pp. 73-100. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Reicosky, DC; TJ Sauer & JL Hatfield. 2011. Challenging balance between productivity and environmental quality: tillage impacts. In: Hatfield, JL & TJ Sauer (eds.) *Soil management: building a stable base for agriculture*. Pp. 13-37. Am. Soc. Agron., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, EEUU.
- RRES. 2007. Rothamsted Carbon Model (RothC). Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, Reino Unido. Programa computacional.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & HP Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de la Regiones Pampeana y Extrapampeana Argentina. *Informaciones Agronómicas* 2:6-12.
- Sánchez, SR; GA Studdert & HE Echeverría. 1996. Descomposición de residuos de cosecha en un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo* 14:63-68.
- SAS Institute. 2009. SAS onlinedoc® 9.2. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, EEUU. <http://www.sas.com> [Último acceso: mayo de 2010].
- Schlichting, E; HP Blume & K Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum*. Paul Parey. Hamburg, Berlin. 209 pp.
- Senapati, N; NR Hulugalle; P Smith; BR Wilson; JB Yeluripati; H Daniel; S Ghosh & P Lockwood. 2014. Modelling soil organic carbon storage with RothC in irrigated Vertisols under cotton cropping systems in the sub-tropics. *Soil Tillage Res.* 143:38-49.
- Siri Prieto, G & O Ernst. 2010. Manejo del suelo y rotación con pasturas: Efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Informaciones Agronómicas* 45:22-26.
- Skjemstad, JO; LR Spouncer; B Cowie & RF Swift. 2004. Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC 26.3), using measurable soil organic carbon pool. *Aus. J. Soil Res.* 42:79-88.
- Smith, P; J Smith; D Powlson; W McGill; J Arah; O Chertov; K Coleman; U Franki; S Frolking & D Jenkinson. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81:153-225.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil taxonomy*. USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, EEUU. 372 pp.
- Studdert, GA & H Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(4):1496-1503.
- Studdert, GA; H Echeverría; EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Studdert, GA; MG Monterubbianesi & GF Domínguez. 2011. Use of RothC to simulate changes of organic carbon stock in the arable layer of a Mollisol of the southeastern Pampas under continuous cropping. *Soil Tillage Res.* 117:191-200.
- Studdert, GA; MN Domingo; GV García; MG Monterubbianesi & GF Domínguez. 2017. Carbono orgánico del suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 35:285-300.
- Weil, RR & F Magdoff. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In: Magdoff, F & RR Weil (eds.) *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Pp. 1-43. CRC Press, Boca Ratón, Florida, EEUU.